

УДК 621.311.25

А.В. ЕФИМОВ, д-р техн. наук, Т.А. ГАРКУША, науч. сотрудник

*Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»,
г. Харьков, Украина*

ОСНОВНЫЕ МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ РАСЧЕТОВ И ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ЭНЕРГОБЛОКОВ АЭС МЕТОДАМИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

В статті розглянуті основні методичні положення розрахунків та оптимізації параметрів енергоблоків АЕС методами математичного моделювання. Енергоблоки розглядаються як складні технічні системи, які містять в собі множину взаємопов'язаного між собою устаткування різного технологічного призначення, що забезпечує виконання складної функції у вигляді виробництва електричної енергії й теплоти. Розглянуті етапи оптимізації параметрів енергоблоків АЕС і відповідні їм ефективні методи математичного моделювання. Урахування розглянутих методичних положень і підходів підвищує ефективність застосування математичного моделювання для вирішення задач розрахунків та оптимізації параметрів енергоблоків АЕС.

Mains systematic thesis of the calculations and optimization of the nuclear turbosets of the method's of mathematical modeling are present in article. The results obtained provide higher efficiency of the mathematical modeling and optimization of the nuclear turbosets.

Современные энергоблоки АЭС являются сложными техническими системами. Они включают в себя множество взаимосвязанного между собой оборудования различного технологического назначения, обеспечивающего выполнение энергоблоками сложной функции в виде производства электрической энергии и теплоты. Такие системы характеризуются многопараметричностью, сложной структурной и функциональной связью параметров, наличием ограничений на изменение параметров и связей, функционированием в условиях воздействия случайных факторов, многообразием протекающих физико-химических процессов. В связи с этим, полные математические модели функционального состояния паротурбинных энергоблоков АЭС характеризуются большим количеством нелинейных (во многих случаях трансцендентных) математических отношений, содержат неявные функции и очень требовательны к ресурсам вычислительной техники [1, 2]. Это затрудняет их широкое применение для решения задач системного анализа качества функционирования энергоблоков.

Оптимизация отдельных параметров и характеристик оборудования энергоблоков АЭС тесно связана с процессами их проектирования и конструирования. Исходными данными для проведения первых предварительных оптимизационных расчетов в процессе проектирования являются конструктивные проработки оборудования. Результаты предварительной оптимизации, учитывающие изменение исходных данных в допустимом диапазоне значений, служат основанием для новых оптимизационных расчетов параметров и конструкций оборудования с учетом специфики условий его работы. Таким образом, оптимизация параметров и характеристик оборудования энергоблоков АЭС является сложным итерационным процессом, а каждый этап оптимизационных исследований по мере создания и совершенствования оборудования характеризуется своими методами и средствами.

На первом этапе оптимизации объем информации об оптимизируемом объекте минимален, а исходные данные имеют значительную погрешность. Поэтому часто невозможно достаточно точно описать взаимосвязь параметров, как между собой, так и с целевой функцией. В связи с этим на первом этапе оптимизационных расчетов наиболее эффективны аналитические методы оптимизации. Они позволяют наглядно выявить влияние соотношений между исходными данными, получить с минимальными затратами времени и средств общие зависимости для определения оптимальных параметров при разнообразных сочетаниях технико-экономических факторов.

На последующих этапах объем информации об объекте оптимизации существенно увеличивается. Выявляются новые термодинамические, конструктивные, режимные факторы и необходимые технические ограничения. Поскольку эти этапы связаны уже непосредственно с созданием оборудования, то необходимо более точно и полно учитывать все факторы, влияющие на целевую функцию, а это значительно увеличивает количество оптимизируемых параметров. В то же время, взаимосвязь между параметрами становится более сложной, и получить аналитическое решение возможно только при значительном упрощении (идеализации) реальных зависимостей.

При математическом моделировании энергоблоков применяются следующие методы идеализации: расчленение на более простые технологические подсистемы (метод декомпозиции); выделение наиболее существенных свойств и воздействий на них в параметрической форме (метод макромоделирования); линеаризация нелинейных моделей в некоторой области изменения переменных (метод линеаризации); приведение системы с распределенными параметрами к системе с сосредоточенными параметрами; пренебрежение динамическими свойствами технологических процессов.

На этапах окончательных оптимизационных исследований наиболее эффективным методом оптимизации является метод имитационного моделирования, который позволяет достигнуть необходимой степени точности в описании оптимизируемого объекта и использовать специальные математические методы нахождения оптимума при решении многофакторных задач нелинейного математического программирования [3].

Для эффективной реализации задач, связанных с определением оптимальных параметров и конструкций оборудования энергоблоков АЭС с помощью математического моделирования и хорошо разработанных методов многофакторной оптимизации, необходимо выполнение ряда требований при их постановке. Практика показывает, что нецелесообразно оптимизировать с помощью одной математической (имитационной) модели весь комплекс параметров, характеризующих данный энергоблок, поскольку при такой постановке задачи оптимизации часто бывают взаимно некорректны вследствие значительного несоответствия в точности различной исходной информации, неравнозначности влияния параметров на целевую функцию, специфических отличий математического описания различных узлов и элементов энергоблока. Для эффективной оптимизации параметров энергоблоков АЭС необходимо создание системы взаимосвязанных математических моделей, включающих в себя: группу подробных математических моделей отдельных узлов и элементов оборудования энергоблоков; более общие математические модели для основного оборудования энергоблоков; полную математическую модель энергоблоков.

В соответствии с изложенным оптимизацию параметров энергоблоков АЭС целесообразно проводить с помощью системы математических моделей основного оборудования: реактора, парогенератора и турбоустановки. Основное оборудование, в свою очередь, целесообразно разделять на характерные узлы. Такое разбиение

позволяет рационально, с учетом специфических особенностей функциональных зависимостей между параметрами каждого узла, построить их математические модели и провести оптимизацию, как отдельных узлов, так и основного оборудования энергоблоков АЭС путем последовательного уточнения.

Параметры каждого узла можно разделить на две группы: внешние параметры, определяющие взаимосвязь между узлами, и внутренние параметры, характеризующие только данный узел, значения которых зависят, в основном, от внешних связующих параметров.

Если для данного узла число внешних параметров невелико, то оптимизацию его внутренних параметров можно проводить в зоне их предполагаемого оптимума отдельно от других узлов при фиксированных внешних параметрах, а затем с учетом оптимальных значений внутренних параметров проводить оптимизацию внешних параметров. Так, парогенератор связан с турбоустановкой следующими параметрами: тепловой мощностью, давлениями, расходами и температурами генерируемого пара и питательной воды. Так как число этих связующих параметров относительно невелико, внутренние параметры парогенератора, такие, например, как скорость воды в трубках теплообменной поверхности, длину трубок, их наружный и внутренний диаметры и другие, можно оптимизировать отдельно от турбоустановки по значениям параметров генерируемого пара и питательной воды, представленных в виде ограничений. По этим же значениям отдельно от парогенератора оптимизируются внутренние параметры турбоустановки. Затем оптимизируются связывающие парогенератор и турбоустановку параметры генерируемого пара и питательной воды с помощью соответствующих математических методов.

Если число связующих параметров между узлами велико, то эти узлы целесообразно оптимизировать совместно в единой модели. Так, например, необходимо совместно с основными теплогидравлическими параметрами тепловой схемы энергоблоков АЭС с реакторами ВВЭР оптимизировать внутренние параметры их систем внешней сепарации и промежуточного перегрева пара, поскольку они связаны разделительным давлением нагреваемого пара, расходами, давлениями и температурами греющего и нагреваемого пара на входе и выходе из ступеней пароперегревателя, потерями давления нагреваемого пара в ступенях пароперегревателя и другими.

Таким образом, задача оптимизации параметров энергоблоков АЭС методами математического моделирования включает в себя: выбор критериев оптимальности (целевых функций); разработку системы взаимосвязанных математических моделей в соответствии с требуемым иерархическим уровнем оптимизационных исследований; выбор вычислительных методов и алгоритмов оптимизации.

При оптимизации параметров энергоблоков АЭС очень важно определить при каких заданных ограничениях целесообразно проводить оптимизацию: при постоянной электрической мощности энергоблока АЭС или при постоянной тепловой мощности реактора энергоблока АЭС. Если проводить оптимизацию при заданной постоянной электрической мощности энергоблока АЭС, то необходимо создавать математическую модель, описывающую функционирование всего оборудования энергоблока АЭС, и при этом учитывать непрерывное изменение тепловой мощности реактора.

В атомной энергетике по соображениям надежности и экономии реакторы обычно проектируются на основе конструкций стандартных тепловыделяющих элементов (ТВЭЛОВ), имеющих фиксированные геометрические характеристики и определенную тепловую мощность. Суммарная тепловая мощность реактора меняется

дискретно путем изменения количества работающих твэлов, причем, что важно, не пропорционально их числу. Эта неравномерность обусловлена тем, что энерговыделение в активной зоне реактора зависит еще и от геометрических размеров самой зоны. В связи с этим учитывать непрерывное изменение тепловой мощности реактора в процессе оптимизации параметров при условии заданной постоянной электрической мощности энергоблока АЭС весьма затруднительно. Поэтому целесообразно оптимизировать параметры энергоблоков АЭС при условии постоянной тепловой мощности реактора, а приведение вариантов к равному энергетическому эффекту осуществлять путем учета изменения электрической мощности энергоблока, то есть введения так называемой замещающей электрической мощности в энергосистеме. При такой постановке для решения задач оптимизации основных теплогидравлических параметров энергоблоков АЭС с реакторами, охлаждаемыми водой под давлением, необходимы математические модели следующего оборудования: реактора, парогенератора, турбины, системы внешней сепарации и промежуточного перегрева пара, системы регенерации и системы «конденсатор-водоохладитель». Глубина детализации математического моделирования этого оборудования должна основываться на принципе равной точности, то есть в каждой модели необходимо учитывать параметры, имеющие одинаковый порядок влияния на целевую функцию.

Учет вышеизложенных методических положений и подходов повышает эффективность применения математического моделирования для решения задач расчетов и оптимизации параметров энергоблоков АЭС.

Литература

1. Палагин А.А. Моделирование функционального состояния и диагностика турбоустановок / А.А. Палагин, А.В. Ефимов, Е.Д. Меньшикова. – Киев: Наук. думка, 1991. – 192 с.
2. Ефимов А.В., Потанина Т.В. Разработка имитационной модели энергоблока АЭС с ВВЭР-1000 для решения задач анализа, управления и диагностики // Энергетика: економіка, технології, екологія. – Київ: НТУУ «КПІ», 2006. – №2 (19). – С. 84-91.
3. Товажнянський Л.Л. Методи і підходи до створення імітаційної моделі енергоблоку АЕС з ВВЕР-1000 для рішення завдань аналізу, діагностики і оптимального управління / Л.Л. Товажнянський, О.В. Єфімов, Т.В. Потаніна, Т.А. Гаркуша // Енергетика та ресурсозбереження. Вестник НТУ «ХПІ»: Сб. научн. трудов. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2007. – № 6. – С. 120-140.

© Ефимов А.В., Гаркуша Т.А., 2008